



P. Cattan, E. Barriuso,
Y.M. Cabidoche,
JB Charlier, M. Voltz.

Quelques éléments clés sur l'origine et le mode de pollution des eaux par les produits phytosanitaires utilisés en agriculture

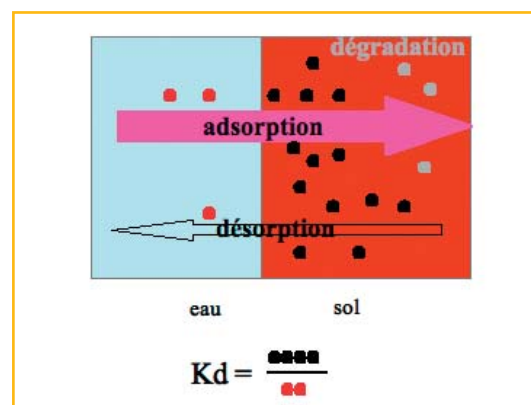
L'emploi de pesticide en agriculture pose la question de leur devenir une fois épandus en parcelle. Idéalement, un pesticide ne devrait pouvoir affecter que l'organisme cible pour lequel il est utilisé. Il doit pour cela présenter une rémanence suffisante pour augmenter les chances d'atteindre sa cible mais aussi se dégrader rapidement pour éviter de contaminer le milieu. Ainsi, alors qu'une molécule doit être présente dans le milieu pour être efficace, elle devient de fait soumise à des vecteurs assurant son transport (air, eau, particules de sol). Elle est alors susceptible d'être transportée sur de grandes distances, de contaminer l'écosystème et de s'introduire dans les chaînes trophiques associées. Les phénomènes en jeu dans ces contaminations sont nombreux et complexes : la molécule est-elle volatile ou soluble ? Est-elle absorbée par les plantes ? Se dégrade-t-elle facilement, dans quels milieux et sous quelles conditions ? Est-elle nocive pour un grand nombre d'espèces, dont bien évidemment l'homme ? Comment les facteurs du milieu (lumière, aération, température, constituants du sol) jouent-ils sur ces paramètres ? ... Devant la complexité des questions soulevées, les solutions aux problèmes de pollution révélés par les analyses dans les eaux, les sols ou les denrées alimentaires sont bien souvent d'en réduire la source, c'est à dire d'arrêter les traitements agricoles sans que des solutions palliatives pour l'agriculteur soient forcément disponibles, pouvant ainsi conduire à l'arrêt de la production.

Depuis quelques années, des travaux ont été engagés en Guadeloupe et Martinique permettant de mieux cerner les déterminants des pollutions agricoles aux Antilles. L'établissement d'un référentiel s'avérerait d'autant plus nécessaire au vu des particularités des sites : conditions climatiques favorisant le développement et le maintien des bioagresseurs, avec une période de production continue sur l'année impliquant des traitements toute l'année ; une forte pression parasitaire ; des flux hydriques en drainage et ruissellement élevés en rapport avec la forte pluviométrie et la forte infiltrabilité des sols ; une capacité d'échange particulière des sols volcaniques à forte teneur en matières organiques et minéraux amorphes (fixation de particules chargées positivement ou négativement, et/ou

apolaire) ; une forte variabilité du sol et du climat sur de courtes distances... Dans ce contexte, les travaux réalisés ont permis, sans répondre à l'ensemble des questions soulevées précédemment, de mettre en évidence quelques points clés qui expliquent en partie le niveau des pollutions actuelles et d'anticiper sur les moyens de contenir des pollutions à venir.

Les résultats présentés ont fait l'objet d'une thèse soutenue en 2007 par JB Charlier [1].

FIXATION DES POLLUANTS DANS LE SOL



Phénomènes physico-chimiques

Les molécules épandues en parcelle vont progressivement se dissoudre dans l'eau du sol et entrer en équilibre avec les constituants du sol (minéraux et matières organiques). Trois phénomènes sont observés. Les molécules subissent, une fois épandues, une **dégradation**, aboutissant à la transformation voire à la minéralisation du pesticide (en éléments simples : CO₂, H₂O, ...). Dans la majorité des cas, une partie des molécules est adsorbée, phénomène **d'adsorption**, sur les constituants du sol, l'autre partie restant en solution sous forme dissoute. Ce processus n'est généralement pas irréversible et on observe parallèlement un phénomène de **désorption** des molécules (schéma 1). Le rapport des concentrations dans le sol rapporté à celles dans l'eau (**Kd**) permet de mesurer le degré d'affinité du pesticide pour le sol. Plus il est faible, plus la molécule sera relarguée facilement et pourra être transférée au compartiment «eau».

Variabilité

Ces phénomènes de dégradation, d'adsorption et de désorption vont déterminer la quantité de polluant présent à un moment donné dans le milieu. Ils interagissent de façon complexe et n'ont pas la même intensité au cours du temps : lorsqu'un pesticide est adsorbé plus longtemps, sa capacité de dégradation est diminuée.

Les résultats d'une étude conduite en Guadeloupe dans la zone de Capesterre Belle Eau avec un nématicide, le cadusafos (organophosphoré), illustre cette variabilité (cf tableau 1). L'étude a été réalisée sur une toposéquence allant des andosols d'altitude aux sols brun rouille à halloysite (figure 1). Les trois classes d'andosols

suivantes sont distinguées en fonction de leur teneur en eau et s'étagent selon des altitudes décroissantes : Andosols perhydratés (en gris); Andosols (en vert); Sols Bruns Andiques (en rouge).

Pour les horizons A de surface, les andosols perhydratés d'altitude fixent fortement le cadusafos (K_d élevé), la molécule y est peu relarguée (fort pourcentage de molécules non désorbées) mais qu'elle est vite dégradée (demi-vie courte) par rapport aux sols à halloysite sur la côte. Les horizons B suivent les mêmes tendances que les horizons A en ce qui concerne la différence entre types de sol. En revanche, le cadusafos est très peu retenu dans ces horizons et que sa vitesse de dégradation y est faible.

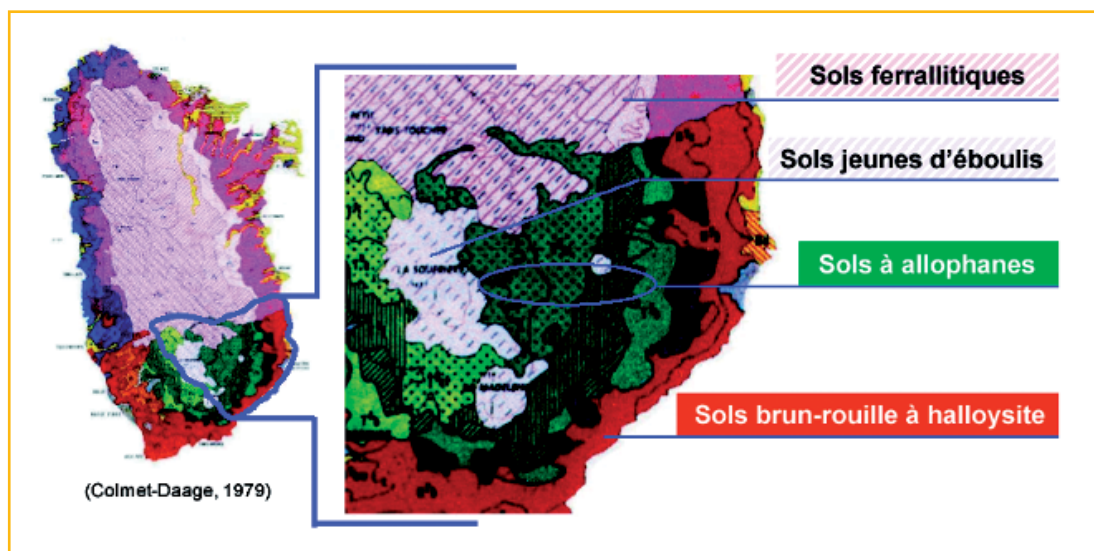


Tableau 1

Altitude (m)		>350	200-350	100-200	0-100
Pluie (mm/an)		>4000	>3000	>2500	>2000
Sol		Andosol perhydraté	Andosol	Sol brun Andique	Sol Brun Rouille à halloysite
K_d (L / kg)	hor. A	29,6	15,5	5,6	2,6
	hor. B	4,5	5,2	0,85	0,57
% non désorbé	hor. A	63,0	60,5	20,7	15,9
	hor. B	19,3	29,8	9,7	5,6
DT50* (jours)	hor. A	16	18	35	32
	hor. B	24	36	45	49
$K_{oc}^{**} = \frac{1000K_d}{C_{org}\%}$	hor. A	309	232	164	154
	hor. B	86	120	59	77

29,6* DT50 = période de demi-vie

** K_{oc} = normalisation des valeurs de K_d par rapport à la teneur en carbone organique

Conséquences

Les paramètres précédents déterminent pour partie la mobilité de la molécule. Un indice de lessivage (indice GUS) peut être calculé à partir des paramètres de rétention et de dégradation de la molécule. Le tableau ci-après montre dans

le cas du cadusafos, que la fixation et la dégradation de la molécule sont favorisées en altitude (indice faible) dans les horizons superficiels par rapport aux sols de plaine. Les risques de pollution seraient donc moindres en altitude. Quel que soit le type de sol, dès que la molécule at-



teint l'horizon B le lessivage du cadusafos est favorisé (indice fort des horizons B) alors que les conditions de dégradation dans cet horizon sont

mauvaises. Les risques de pollutions apparaissent alors maximaux.

Un parallèle peut être conduit pour la chlordé-

		Andosol perhydraté	Andosol	Sol brun Andique	Sol Brun Rouille à halloysite
Indice lessivage $\log_{10}DT50 * (4 - \log_{10}Koc)$	hor. A	1.8	21.1	2.8	2.7
	hor. B	2.9	3.0	3.7	3.6

cone. Cette molécule se caractérise par un Koc très élevé (donc une bien plus grande affinité pour les sol que pour l'eau) et une DT50 quasi infinie (pas de dégradation observée). En l'absence de dégradation, la désorption progressive mais lente de la molécule fixée en masse dans les sols conduit à une pollution chronique. Il existe également une variation de cette désorption selon les types de sol dans le même sens que celle observée pour le cadusafos (respectivement $Koc = 17500 \text{ L/kg}$ pour les sols d'altitude, et $Koc = 2500 \text{ à } 5000$ pour les sols de plaine selon Cabidoche et al., 2006 [2]) : les andosols retiennent plus massivement la molécule. Paradoxalement, il apparaît ainsi possible que les andosols qui comportent les plus gros stocks de chlordécone contribuent moins que les sols de basse altitude à la contamination des eaux et des plantes : **moins d'adsorption sur sol brun rouille conduit à une disponibilité et une diffusion plus intense de la molécule.**

LA MOBILISATION DES POLLUANTS ÉPANDUS SUR LA PARCELLE

L'eau est le principal agent de diffusion et de transport des molécules polluantes épandues en parcelle. Deux types de transport peuvent être distingués selon que les écoulements s'effectuent à la surface du sol (ruissellement) ou dans le sol (drainage) en profondeur.

Ruissellement



Figure 1 : Ruissellement Pseudo tronc de bananier.

Figure 2 : Zone d'érosion préférentielle en bananeraie.

Bien que les sols aient des capacités d'infiltration élevées (conductivité hydraulique à saturation supérieure à 60 mm/h), les fortes intensités pluviométriques enregistrées aux Antilles sont susceptibles de provoquer du ruissellement par dépassement/saturation de la capacité d'infiltration. Dans le cas de certaines plantes (bananier notamment) ce phénomène est accentué par la collecte des eaux de pluie par le feuillage en forme d'impluvium et leur concentration en des points d'égouttage et surtout au pied de la plante qui sont des zones de départ de ruissellement (cf photo 1). En bananeraie, le ruissellement moyen mesuré en Guadeloupe sur andosol à l'échelle d'une pluie varie du simple au double (de 5 à 11%) avec des taux maximum mesurés de 34%.



Les pratiques agricoles influent fortement sur les quantités d'eau ruisselées en modifiant la capacité d'infiltration des sols (réduction par tassement, augmentation par labour par exemple), leur rugosité de surface (paillage végétal par exemple) ainsi que la concentration des flux (pratique de sillonnage). Ainsi une réduction du ruissellement d'un facteur 10 a été observée en bananeraie en Guadeloupe avec un paillage avec les résidus de bananier. Ces pratiques sont susceptibles d'accentuer le transport de particules dans un ancien sillon de plantation au sein des parcelles, comme le montre la photo 2 ci-contre (érosion préférentielle en bananeraie).

Figure 3 : flux d'eau en bananeraie.

Courbe BB : entre 2 bananeraies.

Carte USB : sous une bananeraie.

Figure 4 :

a. évolution temporelle des concentrations en cadusafos dans les eaux selon le mode de transport et la situation dans la parcelle (bleu : ruissellement, rouge: drainage au pied du bananier, vert : drainage dans l'inter rang).

b. exportations cumulées dans les eaux (bleu : ruissellement, rouge : drainage au pied du bananier, vert : drainage dans l'inter rang).

Figure 5 :

a. évolution des concentrations en 3 nématocides dans les eaux de ruissellement.

b. évolution des concentrations en 3 nématocides dans le drainage total.

Drainage

Les fortes capacités d'infiltration des sols alliés à de fortes pluviométries occasionnent des flux élevés de drainage dans les sols. Ces flux ne sont pas répartis uniformément dans l'espace et sont notamment plus élevés au pied du bananier (voir figure 3 courbe UB) où est concentrée de l'eau de pluie recueillie par le feuillage, alors que dans l'inter-rang, les flux de drainage sont beaucoup plus faibles (figure 3 courbe BB).

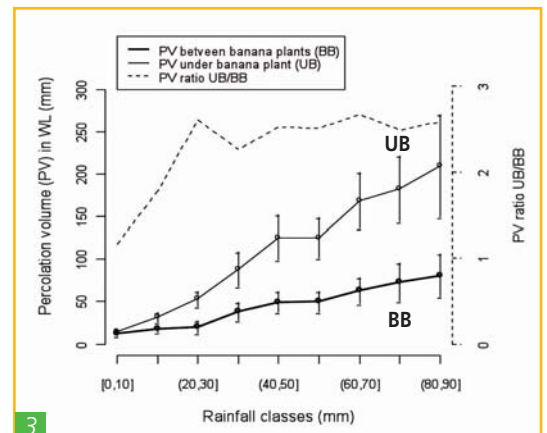
Exportations de polluants

Les éléments polluants peu volatils sont transportés par les eaux de ruissellement et de drainage. Il est important de connaître les quantités d'eau ruisselée et drainée car les concentrations en polluant associées à ces deux types de transport ne varient pas de la même façon au cours du temps, comme le montre la figure 4a. Dans le cas du cadusafos, les concentrations dans les eaux de ruissellement augmentent juste après épandage puis baissent rapidement (figure 4a, courbe bleue).

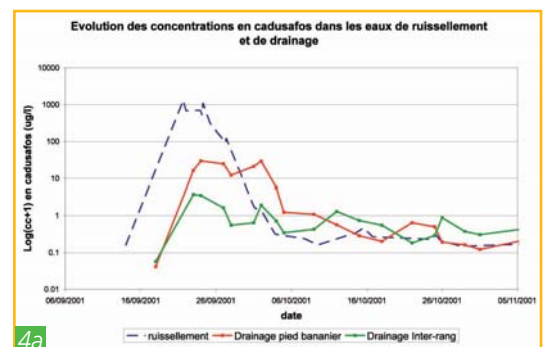
En revanche, les concentrations n'augmentent pas immédiatement dans les eaux de drainage par rapport au ruissellement (figure 4a courbes rouge et verte); de plus elles perdurent à leur niveau maximum durant une période plus longue. Enfin les concentrations sont bien supérieures au pied du bananier, où sont appliqués les nématocides (figure 4b courbe rouge), que dans l'inter-rang (figure 4b, courbe verte).

En conséquence les exportations par ruissellement seront particulièrement contingentes de la pluviométrie au cours d'une courte période juste après épandage. Dans le cas expérimental présenté, les exportations par ruissellement s'avèrent inférieures à celles par drainage sous bananier. L'application localisée des pesticides dans les zones à fort flux de drainage ont pour conséquence d'augmenter les exportations au pied de la plante. C'est, en bananeraie, la principale voie de dispersion des pesticides.

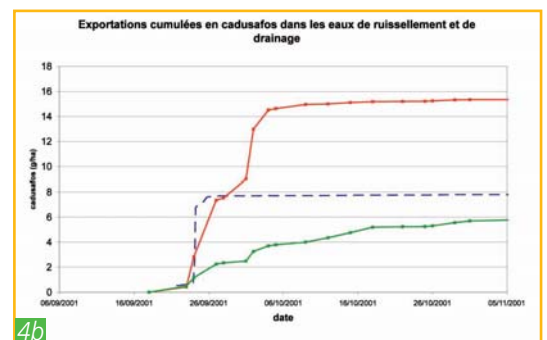
Les dynamiques présentées sont fortement influencées par les types de molécule utilisés en interaction avec les types de sol. Des études comparatives de 3 nématocides, le cadusafos, le fosthiazate et l'aldicarbe ont ainsi montrées que si le cadusafos était fortement mobilisé par le ruissellement, le fosthiazate était relargué dans les eaux de drainage durant une longue période après épandage comme le montre la figure 5.



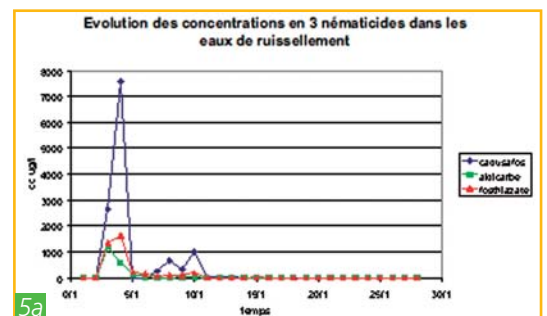
3



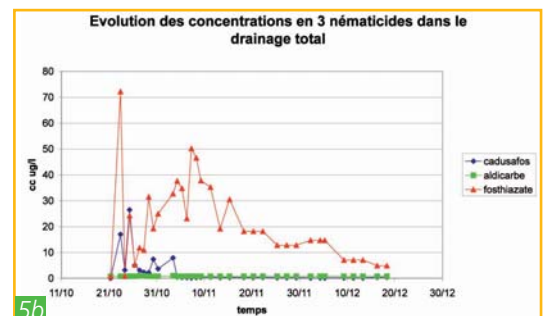
4a



4b



5a



5b



LE TRANSFERT DES POLLUANTS ET LA CONTAMINATION DES AQUIFÈRES À L'ÉCHELLE DU BASSIN VERSANT

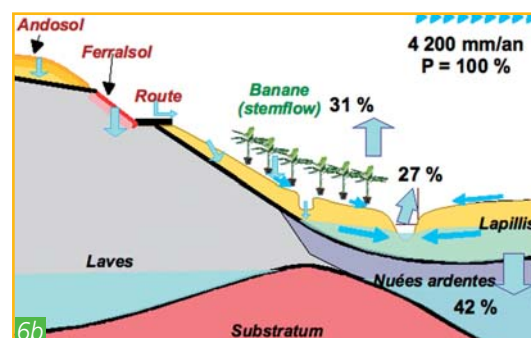
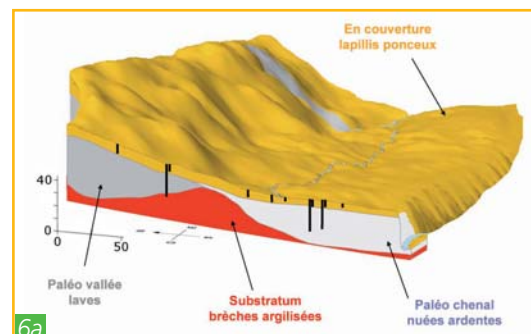
Fonctionnement hydrologique

Les comportements des molécules dans les sols et les eaux, analysés à la parcelle, se répercutent à l'échelle des bassins versants et se traduisent par des dynamiques variées de pollutions des eaux superficielles et des nappes. Une expérimentation menée en Guadeloupe sur un petit bassin versant (18 ha, Féfé / Haut de Capesterre) a permis de le mettre en évidence. Le fonctionnement hydrique de ce bassin a été étudié en 2003 et 2004. Ce bassin est situé dans un environnement géologique complexe (figure 6 a.), et comporte un système de remplissage de paléo-vallées typique des régions volcaniques, orientant les flux hydriques en profondeur (figure 6 b.).

Le bassin est drainé par une ravine alimentée par les eaux de ruissellement en période de crues et par une nappe superficielle. Une nappe plus profonde est en relation avec le réseau hydrographique à une échelle plus large. Les grands flux dominants sont indiqués sur la figure 6 b. et montrent que 90% de l'eau s'infiltre, 42% atteignent la nappe profonde.

Dispersion des pesticides

Un épandage de cadusafos a été réalisé dans la partie amont du bassin de Féfé et la dispersion de ce nématocide a été suivie en sortie de



parcelle, dans les nappes et à l'exutoire du bassin. Les concentrations en sortie de parcelle évoluent de manière comparable à celles présentées précédemment avec un fort pic de concentration après épandage suivi d'une diminution rapide (figure 7). Le suivi piézométrique effectué par ailleurs montre une contamination rapide de la nappe superficielle avec des valeurs se stabilisant autour de 0.2 µg/l. La nappe profonde apparaît également contaminée à un niveau proche de la limite du seuil de détection de la molécule.

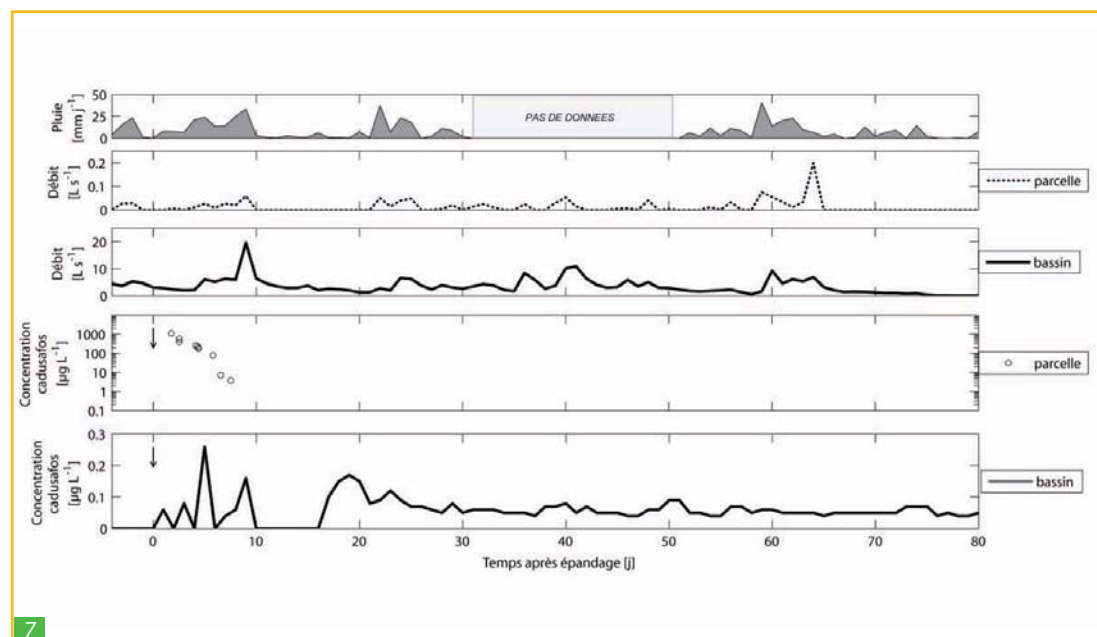


Figure 6 : courbe BB.

a : géologie du bassin versant.

b : système hydrologique du bassin versant.

Figure 7 : concentration de cadusafos à l'échelle du bassin versant et de la parcelle.

Les modes de contamination observés à l'échelle locale se traduisent par différents types de pollution à l'exutoire du bassin (figure 7 concentration de cadusafos à l'échelle du bassin). Une première période de pollution par pic est observée sur le graphique des concentrations en cadusafos en sortie de bassin. Cette période coïncide avec les transports par ruissellement de surface, c'est-à-dire quand les concentrations de cadusafos dans les eaux en sortie de parcelle ne sont pas nulles. L'écart de concentration des eaux entre parcelle et exutoire témoigne d'une dilution importante attribuable pour partie à l'intégration des eaux de ruissellement dans le réseau hydrographique. L'impact du ruissellement en sortie de parcelle est donc réduit en raison des conditions de forte infiltration qui caractérisent les hydrosystèmes étudiés. Une seconde période de pollution de type chronique est observée (période longue à partir d'environ 17 jours après épandage) dont l'origine est attribuable à la contamination de la nappe alimentant la ravine. Sur la période de mesure, la **pollution événementielle** est bien inférieure en quantité à la **pollution chronique**. Sur le long terme, la pollution chronique apparaît être ici le phénomène majeur de contamination de l'environnement.

Enfin des apports différenciés de cadusafos sur le bassin ont montrés que la contribution des différentes unités hydrologiques à la contamination de la ravine n'était pas uniforme. Dans le cas présent, la zone amont du bassin, la plus éloignée de l'exutoire, était le principal contributeur à la pollution de la ravine. En revanche, du fait de la prédominance des transferts souterrains orientés dans l'axe des paléo-vallées, la partie aval du bassin contribue moins à la contamination de la ravine et plus fortement à celle du système hydrologique extérieur au bassin d'étude.

CONSÉQUENCES ET CONCLUSION

Les résultats obtenus ont plusieurs implications. La première porte sur l'évaluation de pratiques susceptibles de diminuer les pollutions. Nous avons vu que si la réinfiltration du ruissellement en parcelle et dans le réseau hydrographique tamponne le pic de pollution en ravine, le développement d'une pollution chronique à partir de la contamination des nappes représente la principale source de pollution. En conséquence, contrairement au cas où la pollution des eaux est majoritairement issue du ruissellement de surface, l'augmentation de l'infiltration en par-

celle (dispositifs de bandes enherbées par exemple ou labour) risque ici d'aggraver la pollution de la nappe superficielle et donc de la ravine.

Une seconde implication porte sur les modes de suivi des pollutions sur un bassin. Ainsi, l'analyse des eaux en sortie de bassin, qui est le procédé le plus communément pratiqué, ne permet, le plus souvent, que de constater l'existence d'une pollution chronique qu'il est très difficile de traiter. L'orientation du diagnostic de pollution en amont des phénomènes observés permettrait alors d'améliorer la capacité et l'efficacité d'intervention. Ainsi il apparaît utile, dans ces contextes hydrologiques spécifiques, d'effectuer des mesures complémentaires de polluants dans les sols et les nappes afin d'évaluer leur stocks ainsi que les risques de pollutions qui en découlent et les mesures à mettre en oeuvre.

Une troisième implication porte sur les connaissances minimales à acquérir pour gérer les pollutions dans ces milieux particuliers. L'hétérogénéité des régions volcaniques implique de réaliser une étude hydrologique «minimale» permettant d'identifier les grands flux (ruissellement et drainage), les principaux aquifères ainsi que leurs connections. Cette complexité implique également de travailler à des petites échelles (de l'ordre d'une 10^e d'hectare). Ces études sont un préalable à la définition de zonage ou de périmètres de protection contre les pollutions

Au-delà de l'évaluation des pollutions, l'enjeu reste, dans nos conditions antillaises, la limitation du transport des pesticides vers les horizons profonds. Des solutions sont envisageables pour diminuer la concentration en sortie de bassin et s'appuient à la fois sur la connaissance des transferts hydriques et sur la réduction de la quantité de polluant mobilisable à un même moment :

- à l'échelle de la parcelle il s'agit de, (i) la délocalisation des épandages hors des zones présentant un fort flux de drainage (base du pied de bananier notamment), (ii) la réalisation des épandages en conditions de sols non saturés, c'est-à-dire plutôt en période sèche, (iii) l'adaptation des fréquences d'épandage à la persistance de la molécule dans le milieu, c'est-à-dire la réduction des fréquences pour les molécules à faible vitesse de dégradation.
- à l'échelle du bassin versant, la réduction de la charge instantanée en pesticides fait appel à la désynchronisation des épandages entre parcelles. Elle nécessite (i) soit une adapta-



tion des pratiques d'épandage - l'agriculteur traite en général l'ensemble de ces parcelles pour des raisons d'organisation du travail, d'approvisionnement et de stockage des pesticides qu'il faut en conséquence modifier – (ii) soit une gestion concertée des apports entre les exploitations présentes sur le bassin versant. Enfin la réduction de la charge globale peut emprunter d'autres voies, notamment en s'appuyant soit sur une évolution de l'occupation du sol vers des cultures nécessitant moins de produits phytosanitaires, soit sur une évolution des pratiques agricoles vers des systèmes de culture utilisant moins d'intrants qui font aujourd'hui l'objet de recherches poussées.

Les résultats de notre étude concernant la contribution des surfaces cultivées à la pollution par les pesticides, permettent d'orienter les pratiques culturales vers une gestion plus fine dans l'espace agricole. Dans le cas expérimental présenté, réduire la pollution de la ravine invite à faire porter les efforts de réduction des pesticides sur la partie amont du bassin.

Enfin, on notera que les études ont été réalisées dans le cas de sols peu érodibles. Cependant, des pluies de très fortes intensité et/ou durée et des erreurs de travail du sol ou d'aménagement des parcelles peuvent conduire à des transferts de polluants fixés aux agrégats transportés (transport solide), vers des parcelles connexes, et vers les zones de sédimentation de rivière ou côtières.

En conclusion, les études présentées mettent en évidence l'incidence environnementale d'épandages de pesticides liés à l'activité agricole dans les

conditions d'un climat à fortes précipitations et de sols très infiltrants à forte teneur en matières organiques. Notamment, la capacité des andosols du bassin d'étude à fixer la molécule de cadusafos en surface a favorisé l'établissement d'un stock de pesticide pouvant se libérer progressivement.

Dans nos conditions, la forte infiltration prend le pas sur le ruissellement de surface, et entraîne les pesticides au-delà des horizons de surface. Ce transfert aboutit à la contamination de la nappe superficielle. Cette contamination se traduit par l'apparition d'une pollution chronique de la ravine. Ce type de pollution représente la majorité des quantités de polluant exportées.

Les compartiments d'eau contaminés reflètent la structure géologique complexe du bassin de Fédé : un réservoir superficiel, composé de lapillis, rapidement exposé à la pollution et un réservoir profond, composé de nuées ardentes et de laves, relativement protégé de toute contamination lors des épandages réalisés. L'étude préalable du fonctionnement hydrique de bassin constitue ainsi un élément indispensable à la compréhension des dynamiques de pollution sur le bassin. Cette donnée essentielle à acquérir complique, dans un milieu volcanique extrêmement disparate, les possibilités d'extrapolation des résultats à d'autres bassins.

Finalement, l'étude montre qu'une approche globale des bassins reste insuffisante pour aller au-delà du diagnostic de pollution et proposer des solutions en matière de traitement différencié des zones d'un bassin vis-à-vis de l'épandage des pesticides. Les différences de contribution des zones amont et aval du bassin d'étude aux pollutions en témoignent. Ceci justifie la mise en place d'un outil de modélisation spatialisé qui est en cours d'élaboration.

Figure 1 : relevé des données de la centrale d'acquisition.

Figure 2 : jaugeage au moulinet.

Figure 3 : prélèvement de matières en suspension en crue dans une ravine.

Figure 4 : maintenance d'une station de mesure.

Figure 5 : Baie du Robert.

